

1 实验 4.1 电路基础——电阻

1. 实验原理

(1) 测量电阻

电子万用表内部较为复杂，总体上根据欧姆定律： $I = \frac{U}{R}$

(2) 电阻的串联与并联

电阻串联： $R_{eq} = \sum_{i=1}^n R_i$ ；电阻并联： $\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$

2. 实验过程

- (1) 利用万用表的欧姆档，取 5 组标称不同的电阻，每组中取 5 个电阻进行测量。
- (2) 进行电路的串联和并联，各使用 5 种不同的组合，计算其理论值，并与实测值比较。

3. 实验结果

(1) 选用 5 组电阻的色环图为：

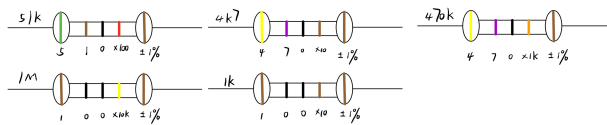


图 1: 色环图

(2) 实测数据：

实测值						
	1	2	3	4	5	相对误差 (%)
51k ± 1%	49.9	50.6	51.2	50.5	51	-0.71
1M ± 1%	0.999	1.011	0.987	0.985	0.999	-0.38
标称电阻 4k7 ± 1%	4.63	4.62	4.64	4.65	4.65	-1.32
1k ± 1%	0.977	0.973	0.975	0.991	0.973	-2.22
470k ± 1%	0.468	0.471	0.472	0.476	0.478	+0.64

图 2:

电阻	组号	标称	实测	理论阻值	实际阻值	相对误差 (%)
串联	1	470kΩ	0.468 MΩ	0.939 MΩ	0.939 MΩ	0.000
		470kΩ	0.471 MΩ			
	2	1kΩ	0.975 kΩ	5.595 kΩ	5.61 kΩ	0.268
		4k7Ω	4.62 kΩ			
	3	1MΩ	1.011 MΩ	1.012 MΩ	1.013 MΩ	0.099
		1kΩ	0.991 kΩ			
	4	51kΩ	50.5 kΩ	1.037 MΩ	1.036 MΩ	-0.096
		1M Ω	0.987 MΩ			
	5	470kΩ	0.472 MΩ	0.473 MΩ	0.473 MΩ	0.000
		1k Ω	0.991 kΩ			
电阻	组号	标称	实测	理论阻值	实际阻值	相对误差 (%)
并联	1	1kΩ	0.987 kΩ	0.492kΩ	0.491kΩ	-0.203
		1kΩ	0.975 kΩ			
	2	470kΩ	0.478 kΩ	158Ω	158.2Ω	0.127
		470kΩ	0.468 kΩ			
	3	1MΩ	0.985 MΩ	46.6kΩ	46.7kΩ	0.215
		51kΩ	48.9kΩ			
	4	1MΩ	1.011 MΩ	0.976kΩ	0.979kΩ	-0.096
		1kΩ	0.977kΩ			
	5	1kΩ 串 1kΩ	0.981kΩ 串 0.981kΩ	1.954kΩ	1.963kΩ	-0.096
		470kΩ 串 470kΩ	0.468MΩ 串 0.476MΩ			

图 3: 串联电阻

图 4: 并联电阻

(3) 误差分析：

从表中数据可以看到，电阻的实际数值和色环的标称数值存在一定的差距，相对误差基本稳定在色环指示的 1%，结果受测量精度的影响。

· 电阻相关因素

(a) 加工过程中存在的误差

电阻的生产加工并不是理想完美的，由于加工工艺的限制，与标称的真值存在一定误差。

(b) 电阻自身性质发生变化

在储存，运输的过程中，所用薄膜电阻表面的镀膜可能由于摩擦，老化等原因发生破损或者电阻率发生改变等，导致其发生一定变化。同时，在测量过程中如果用力不当等也有可能造成薄膜破损或电阻变形等。

· 万用表自身原因

(a) 万用表的精度

使用万用表测量时，需注意万用表的测量本身具有一定误差。其自身精度存在限制。

(b) 万用表老化

由于所用的万用表已经购置多年，在储存过程中电路可能出现老化，导致测量出现误差。

(c) 万用表自身特性

由于万用表的电阻档是非线性的，在不同档位时可以较为精确测量的阻值不同。（对机械万用表来说，在指针越靠近中央时，误差越小。本次使用的数字万用表可能与此略有不同）

· 人为因素

在使用万用表测量电阻时，发现阻值随时间的波动比较明显。注意到这一点后，等待直到显示的阻值稳定后再读数，但无法保证在一段时间后其再发生变化。

2 实验 4.2 电路基础——电容

(1) 测量电容的原理

数字万用表测量和电容的过程中，一种方法是测振荡的时间周期。通过选择充电电阻的确切大小，可以直接以纳法拉或微法拉为单位获得读数。其中需要用 555 计时器。

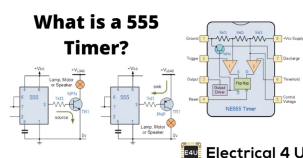


图 5: 555 计时器

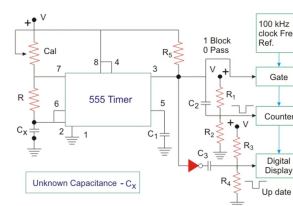


图 6: 带有 555 定时器 IC 的基本数字电容表框图

如果电容器有任何泄漏，此方法将创建的电容值小于实际值。这种方法也是大多数旁路和定时电路中测试电容器行为的有效指标。

555 定时器作为一个非稳态多谐振荡器工作。该多谐振荡器的频率由未知电容值 (C_X) 控制。这个多谐振荡器的输出连接到一个数字计数器。这个计数器可以测量方波的周期长度。由 555 个定时器组成的方波的周期长度： $T = 0.7C_X \times (\text{Resistor between pin 7 and 8} + 2 \times \text{Resistor between 7 and 6})$

在充电曲线的峰值处，数字计数器将被复位。此时，一个 100 kHz 脉冲的时钟被打开，并被发送到计数器。接下来，在循环的放电部分完成后，显示将得到更新，可以简单地读出电容器的值。

(2) 电容的串联和并联

电容串联： $\frac{1}{C_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$ ；电容并联： $C_{eq} = \sum_{i=1}^n C_i$

2. 实验过程

- (1) 利用万用表的电容档，取 5 组标称不同的电容，每组中取 5 个电容进行测量。
- (2) 进行电容的串联和并联，各使用 5 种不同的组合，计算其理论值，并与实测值比较。

3. 实验结果

(1) 实测数据

		实测值					相对误差 (%)
		1	2	3	4	5	
标称电容	470μF	514	571	542	545	530	14.98
	100μF	107.5	106.2	110.1	110.9	109.7	8.88
	4.7μF	4.83	5.22	4.79	5.08	4.99	6.00
	47μF	50.7	50.6	51.6	50.1	50.3	7.79
	1μF	1.074	1.081	1.102	1.073	1.111	8.82

图 7:

电容	组号	标称 (μF)	实测 (μF)	理论电容 (μF)	实际电容 (μF)	相对误差 (%)
串联	1	100	109.6			
		100	106.2	36.29	35.82	-1.30
		100	111			
	2	47	52.2	25.71	25.64	-0.27
		47	50.7			
并联	3	1	1.111	0.916	0.915	-0.11
		4.7	5.22			
	4	47	51.6	35.13	34.53	-1.71
		100	110.1			
	5	470	542	91.51	90.8	-0.78
		100	110.1			

电容	组号	标称 (μF)	实测 (μF)	理论电容 (μF)	实际电容 (μF)	相对误差 (%)
并联	1	1	1.081	2.183	0.491	-77.51
		1	1.102			
	2	47	51.61	56.44	56.6	0.28
		4.7	4.83			
	3	100	106.2	648.2	649	0.12
		470	542			
	4	100	107.5	108.611	108.7	0.08
		1	1.111			
	5	470	545	1087	1097	0.92
		470	542			

图 9: 并联电容

图 8: 串联电容

(2) 误差分析

可以看出，电容的实测值和其标称值相差远大于电阻。且电容的实际值大多大于标称值。

- 1. 电容自身
 - (1) 电解电容的制作工艺：

由于电解电容器铝箔材料的腐蚀化工艺决定其单位面积内的比容并不是一成不变的，这就导致了同 一批生产出的电解电容容量也不同，其误差一般在 ±20%。

- (2) 电容自身性质发生变化

在储存，运输的过程中，电容内部的物理化学性质可能发生变化，影响其容量。从外观观察和得到的数据来看，所得到的电容并没有漏液。
- 2. 万用表自身原因和人为因素
- 与测量电阻的误差分析中 2. (a) (b)，3 同，不再赘述

3 实验 4.3——滤波器

1. 实验原理

以下是用 Multisim 绘制的低通和高通电路:

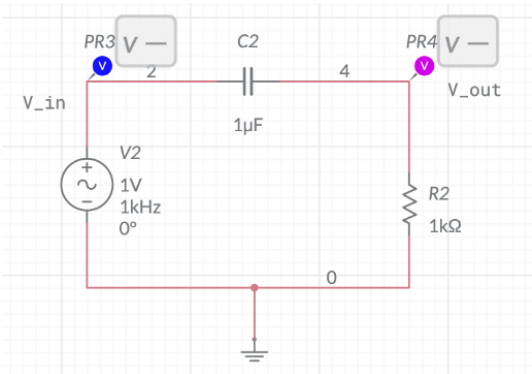


图 10: 高通电路

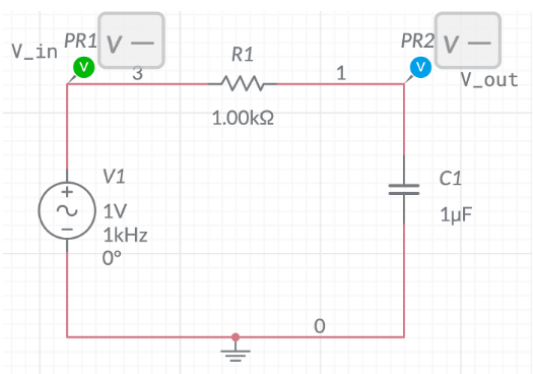


图 11: 低通电路

高通电路: 通高频阻低频。其中, $V_{out} = \frac{1}{(1+\omega^2 R^2 C^2)^{1/2}} V_{in}$, $f_{3dB} = 1/2\pi RC$
低通电路: 通低频阻高频。其中, $V_{out} = \frac{2\pi f RC}{[1+(2\pi f RC)^2]^{1/2}} V_{in}$, $f_{3dB} = 1/2\pi RC$

2. 实验过程

- (1) 选择 5 种不同的 RC 组合, 记下它们的参数并测量真实值
- (2) 对于每种组合, 将它们分别接成低通, 高通电路, 每组测量其频率响应
- (3) 尝试不同频率, 并综合 multisim 模拟的方法, 绘制响应曲线

3. 实验结果

- (1) 不同 RC 组合的相关数据和滤波情况, 响应曲线

实验中为了最大程度体现出滤波效果, 输入为高频信号和低频信号进行叠加, 经过滤波器后, 可更好地体现滤波器的功能。

序号	1		2		3		4		5	
	高通	低通	高通	低通	高通	低通	高通	低通	高通	低通
电容标称 (μF)	100		33		33		100		4.7	
电阻标称 (Ω)	10		10		10		150		150	
电容实测 (μF)	110.9		33.08		33.05		110		4.8	
电阻实测 (Ω)	9.8		9.8		21.7		149.7		149.7	
频率 1 (Hz)	10	10	50	50	10	50	1	1	20	20
Vout/Vin 理论	0.0681	0.9977	0.1013	0.9949	0.0204	0.9926	0.1029	0.9947	0.0899	0.9959
Vout/Vin 实际	0.0583	0.9748	0.1117	0.9821	0.0310	0.9772	\	0.9504	0.0432	0.9763
相对误差 (%)	-0.144	-0.023	0.103	-0.013	0.520	-0.016	\	-0.045	-0.519	-0.020
频率 2 (Hz)	1000	3000	10000	10000	10000	10000	1100	1100	10000	10000
Vout/Vin 理论	0.9894	0.0488	0.9998	0.0490	0.9988	0.0490	1.0000	0.0088	0.9998	0.0221
Vout/Vin 实际	0.9350	0.0571	0.9305	0.0714	1.0000	0.0667	0.9456	0.0134	0.9918	0.0348
相对误差 (%)	-0.055	0.170	-0.069	0.457	0.001	0.361	-0.054	0.523	-0.008	0.575

图 12:

其中的‘\’为因数据比例尺的原因, 无法复原完整的周期, 无法分析得到此数据。
以下为低通和高通的例子: (其中蓝色信号为输入, 黄色为通过滤波器的信号)

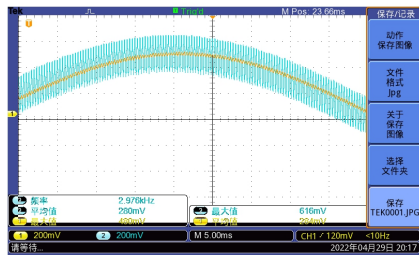


图 13: 低通滤波

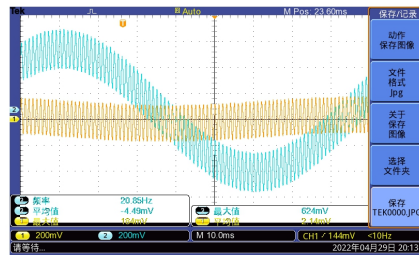


图 14: 高通滤波

注意到在切换频率时，没有主动调整的情况下，信号曲线会向上/下无规律平移（即使这理论上不会影响结果）。其中，在绘制高通滤波的响应曲线时，由于采集的数据量不足，在之前数据的基础上，用 Multism 模拟了一些数据点后进行拟合。 $f_{3dB} : V_{out}/V_{in} \approx 0.7$ 符合预期。

响应曲线（低通）	f(Hz)	Vout/Vin	Vout/Vin 实际	f(Hz)	Vout/Vin	f(Hz)	Vout/Vin
电容标称 μF	4.7	20	0.9909	120	0.8777	600	0.3544
电阻标称 Ω	150	40	0.9687	220	0.7142	700	0.3291
电容实测 μF	4.83	60	0.9463	300	0.5731	850	0.2531
电阻实测 Ω	149.7	80	0.9456	410	0.5063	950	0.2151
f_{3dB}	220.12	100	0.9239	500	0.4303	1250	0.1392

响应曲线组（高通）	f(Hz)	Vout/Vin	f(Hz)	Vout/Vin	f(Hz)	Vout/Vin	f(Hz)	Vout/Vin	
电容标称 μF	4.7	20	0.0432	500	0.9143	1100	0.9803	1700	0.9916
电阻标称 Ω	150	40	0.1777	600	0.9381	1200	0.9834	1800	0.9925
电容实测 μF	4.83	100	0.4115	700	0.9534	1300	0.9858	10000	0.9981
电阻实测 Ω	149.7	200	0.6702	800	0.9637	1400	0.9877		
f_{3dB}	220.12	300	0.8045	900	0.971	1500	0.9893		
		400	0.8748	1000	0.9763	1600	0.9906		

图 15: 响应曲线数据

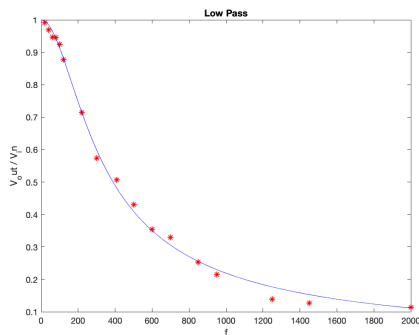


图 16: 低通滤波的响应曲线

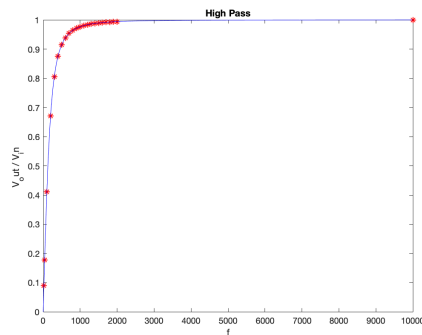


图 17: 高通滤波的响应曲线

(2) 误差分析:

- 信号发生器产生的信号自身具有噪声, 示波器采集信号的同时也有信号损失
- 采集到的数据本身有精度限制, 从图像分析数据受到图像的分辨率限制

参考文献

- [1]Electrical4U. Capacitance Meter[EB/OL]. [2022.5.12]. <https://www.electrical4u.com/capacitance-meter/>. DeleteEdit
- [2]Electrical4U. 555 Timer and 555 Timer Working[EB/OL]. [2022.5.12]. <https://www.electrical4u.com/555-timer-and-555-timers-working/>.